



HF-radiolähetin

Opinnäytetyö

Juho Horttana

Elektroniikan koulutusohjelma

Sulautetut järjestelmät

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO Koulutusohjelma Elektroniikan koulutusohjelma		
Tekijä Juho Horttana		
Työn nimi HF-radiolähetin		
Työn laji Insinöörityö	Päiväys 06.12.2010	Sivumäärä 35
Työn valvoja Arto Toppinen		
Yritys Anturikeskus Oy		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli suunnitella HF-taajuusalueella toimiva radiolähetin. Suunniteluvaatimukset ja perustiedot tulivat valmiina toisesta opinnäytetyöstä, jota voidaan pitää tämän työn pohjustuksena.</p> <p>Työssä selvitettiin laitteen rakenne ja sen vaatimat komponentit. Näiden tietojen perusteella tuli löytää sopivat komponentit suomalaisilta toimittajilta. Komponenttien toiminta testattiin yksittäin, sekä myöskin kokonaisuutena. Lopuksi piirrettiin toimivaa laitetta vastaava piirilevy.</p> <p>Tämä opinnäytetyö sisältää analogia- ja digitaalelekroniikan suunnittelua sekä ohjelmointia.</p>		
Avainsanat radiolähetin, vaihelukittu silmukka		
Luottamuksellisuus julkinen		

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES		
Degree Programme Electronics		
Author Juho Horttana		
Title of Project HF radiotransmitter		
Type of Project Final Project	Date 06.12.2010	Pages 35
Academic Supervisor Arto Toppinen		
Company Anturikeskus Oy		
Abstract <p>The aim of this thesis was to design a radio transmitter that works in HF frequencies. Layout demands came from another thesis which can be considered as a basis of this thesis.</p> <p>Structure and components of the device were defined at the beginning of this thesis. According to this information, the components needed to be found from the Finnish suppliers. Functionality of the components was tested separately and also in one complete system. In the end a circuit board of the transmitter was designed.</p> <p>This thesis includes designing of analog and digital electronics and some programming.</p>		
Keywords radiotransmitter, phaselocked loop		
Confidentiality public		

ALKUSANAT

Tämän opinnäytetyön tekeminen ajoittui kevään ja kesän 2010 ajalle. Haluan kiittää kaikkia minua tässä työssä auttaneita, erityisesti ohjaavaa opettajaa, yliopettaja Arto Toppista sekä elektroniikkasuunnittelija Timo Ollikaista.

Helsingissä 06.12.2010

Juho Horttana

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	6
2.	Suunnitteluvaatimukset ja komponenttien valinta	7
2.1	Suunnitteluvaatimukset	7
2.1.1	Taajuus	7
2.1.2	Modulointi.....	7
2.2	Rakenne ja komponentit	8
2.2.1	Proessori	9
2.2.2	Referenssioskillaattori.....	10
2.2.3	Jänniteohjattu oskillaattori, VCO.....	11
2.2.4	Vaihevertailija, PFD.....	13
2.2.5	Alipäästösuodatin.....	15
2.2.6	Jakajapiirit.....	15
2.2.7	Modulaattori.....	20
3.	Kokoaminen ja testaus	21
3.1	Proessori.....	21
3.2	Referenssioskillaattori	23
3.3	Jänniteohjattu oskillaattori, VCO	24
3.4	Vaihevertailija, PFD	26
3.5	Alipäästösuodatin	27
3.6	Jakajapiirit	27
3.6.1	Referenssijakaja	27
3.6.2	Takaisinkytketty jakaja	28
3.7	Modulaattori	29
3.8	Kokonaisuuden testaaminen	30
3.8	Piirilevy	31
4.	Yhteenveto	33
5.	Lähdeluettelo.....	34

1. Johdanto

Tietoliikenteen merkitys lisääntyy koko ajan. Langaton tiedonsiirto on ottamassa haltuunsa yhä suuremman osan jokapäiväisestä tiedonsiirrosta. Kaapelointeja ei ehkä ehditä rakentaa kiihtyvän tarpeen mukaan, ja kaapeleiden vetäminen maahan tai ilmaan on kallista. Tällaisissa tilanteissa on aika turvautua langattomiin ratkaisuihin. Langaton tekniikka mahdollistaa informaatioverkon perustamisen nopeasti ja alhaisin kustannuksin.

Tämä insinöörityö perehtyy langattoman informaation lähettämiseen tarvittavaan välineeseen, radiolähettimeen, ja sen suunnitteluun. Tässä työssä käsiteltävä lähetin ei suinkaan ole viimeisintä tekniikkaa sisältävä kallis laite, vaan tarkoitus oli saada aikaan kustannuksiltaan edullinen ja teknisesti toimiva laite. Lähettimen tuli pysyä määrätyllä taajuusalueella ja sen tuli myös pystyä vaihtamaan lähetystaajuuttaan tietyin ennalta määritellyin kanavaväleihin.

2. Suunnitteluvaatimukset ja komponenttien valinta

2.1 Suunnitteluvaatimukset

Radiolähettimen suunnitteluvaatimuksiin kuuluivat mm. taajuus ja modulointitapa. Nämä kyseiset tiedot tulivat suoraan Sampsa Korhosen tekemästä opinnäytetyöstä. Korhosen työ käsittelee radiotaajuuksien tutkimista erilaisissa olosuhteissa ja ympäristöissä. Kyseinen työ on ns. alkukartoitus tälle opinnäytetyölle. Korhosen tekemän työn merkitys on huomattava, ottaen huomioon sieltä saatavat, radiolähettimen suunnitteluun vaikuttavat, pohjatiedot. Laitteen suunnittelusta tuli huomattavasti suoraviivaisempaa kunnollisten suunnitteluvaatimusten ansiosta.

2.1.1 Taajuus

Taajuus oli yksi tärkeimpiä suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä. Korhosen opinnäytteestä selvisi, että tämän radiolähetinprojektin käytettävissä oleva taajuusalue oli 29.810 MHz - 29.940 MHz ja taajuuksien välinen ”hyppäys”, steppi, oli 10 kHz esim. 29.810 MHz, 29.820 MHz, 29.830 MHz. Radiolähettimen oli siis pystyttävä lähettämään informaatiota koko kyseisellä taajuusalueella ja pystyttävä vaihtamaan lähetystaajuuttaan 10 kHz:n välein. Lähettimen tuli pysyä annetulla taajuusalueella, sillä muiden kuin edellämainittujen taajuuksien käyttäminen Suomessa tämäntyyppisessä käytössä on kiellettyä. [10]

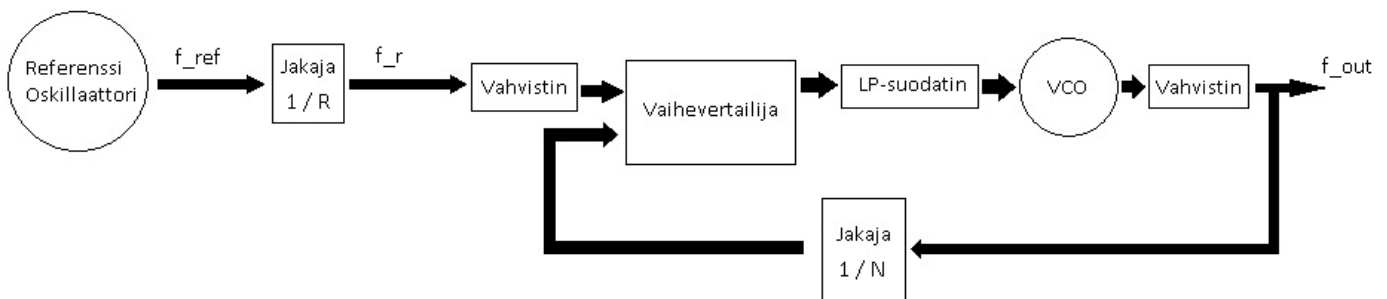
2.1.2 Modulointi

Modulointitapa tarkoittaa tapaa, jolla haluttu informaatio lähetetään siirtotietä pitkin. Siirtotienä voivat toimia esimerkiksi kaapelit tai radioaallot. Modulointivaihtoehtoja on yleisesti ottaen monia, kuten FM (taajuusmodulaatio) ja AM (amplitudimodulaatio). [8] Korhosen työstä kävi ilmi, että modulointitapana tässä tapauksessa oli helpointa ja edullisinta käyttää sähkötystä. Sähkötystä kutsutaan myös kansanomaisemmin nimellä morsetus. Morsetuksessa lähetettävä informaatio moduloidaan kantoaalto-signaaliin katkomalla kantoaaltoa.

2.2 Rakenne ja komponentit

Radiolähtetimen rakenne perustuu PLL (Phase Locked Loop) -rakenteeseen, vaihelukittuun silmukkaan. Vaihelukittua silmukkaa voidaan käyttää mm. telekommunikaatiossa, radiolähtetimissä, taajuuden kertomisessa tai signaalien etsimiseen ja muodostamiseen kohinan seasta. [4]

Vaihelukittuun silmukkaan kuuluvat yleensä ainakin vaihevertailija, jänniteohjattu oskillaattori ja alipäästösuodatin. Joissakin tapauksissa rakenteeseen voidaan lisätä vahvistimia ja taajuusjakajia käsittelemään ja parantamaan signaalia. Tässä tapauksessa rakenteeseen kuului referenssioskillaattori, jänniteohjattu oskillaattori, kaksi jakajapiiriä, vaihevertailija ja alipäästösuodatin. [4]



Kuva 1. PLL-suunnitelma.

Jotta PLL:n muodostama ulostulotaajuus voitiin laskea, tarvittiin seuraavia kaavoja:

$$f_{out} = \frac{N}{R} * f_{ref} \quad (1)$$

$$f_{out} = N * f_r \quad (2)$$

Kaavojen avulla oli helppo laskea tarvittavat jakajapiirien jakosuhteet, joilla määriteltiin sopiva lähetystaajuus sekä kanavaväli.

Tässä työssä vaihelukitun silmukan tarkoitus oli tuottaa kantoaaltotaajuus, jolla tarvittava informaatio lähetettiin. Lisäksi itse radiolähtettimeen kuului vaihelukitun silmukan lisäksi vielä prosessori ja modulaattori. Prosessoria tarvittiin mm. toisen jakajapiirin ja modulaattorin

ohjaamiseen. Modulaattorin tehtävänä oli suorittaa halutun mukainen modulointi kantaosalle. Kaikille tarvittaville piireille tuli löytyä yhteinen käyttöjännite, mikä helpottaisi työtä piirilevysuunnitteluvaiheessa.

2.2.1 Prosessori

Prossessorin tehtävänä oli ohjata toista jakajapiiriä ja modulaattoria. Prosessoriin ohjelmoitiin myös lähetettävä data.

Prossessorin tuli olla hinnaltaan edullinen ja helposti ohjelmoitavissa nykyisillä ohjelmointitaidoilla. Helpoin tapa vertailla prosessoreja oli Internetin tarjonnan tarkastelu. Lyhyen tarkastelun perusteella voitiin todeta, että MicroChipin valmistamat PIC-prosessorit olivat sopivia tähän tarkoitukseen, johtuen niiden hintatasosta ja helppokäyttöisyydestä. Esimerkiksi PIC16-sarjan prosessorien hinnat alkavat yksittäiskappaleina 0,58 eurosta ylöspäin. [1]

Microchipillä oli tarjolla 8-, 16- ja 32-bittisiä prosessoreita. Myös prosessoreiden muissa ominaisuuksissa, kuten pinnimäärässä, muistikapasiteetin koossa ja käyttöjännitteessä, oli eroja. Mitä kalliimpi prosessori, sitä enemmän siinä oli ominaisuuksia. [2]

Prossessorin bittimääräksi riitti 8 bittiä. Tämän tyyppinen yksinkertainen prosessori oli riittävän tehokas suorittamaan sille asetetut tehtävät. MicroChipillä oli tarjolla PIC10-, PIC12-, PIC16- ja PIC18-prosessoriperheet. Pinnimäärän tuli olla riittävän suuri, sillä yksi pinni tarvittiin dataulostuloksi ja loput pinnit ohjaamaan jakajapiiriä. PIC10- ja PIC12- sarjan prosessorit jäivät pois laskuista johtuen niiden liian pienestä pinnimäärästä. PIC18-sarjan prosessoreissa oli turhia ominaisuuksia, ja se näkyi myös hinnassa, joten tämäkin sarja voitiin rajata pois. [1], [2], [3]

Sopiva vaihtoehto löytyi PIC16-sarjasta. Prosessoriksi valittiin PIC16F690-prosessori. Se sisälsi riittävän määrän pinnejä, eli 18 ohjelmoitavaa I/O-pinniä. Prosessorin käyttöjännitealue oli 2.0 V - 5.5 V, eli vähintäänkin riittävä. Ohjelmoitavaa Flash-muistia löytyi 7 KB:n verran, mikä riitti hyvin ohjelmakoodin tarpeisiin. Yksittäisen prosessorin hinnaksi Farnell tarjosi 1,62 €/kpl. Mikäli tilattaisiin suurempia määriä, kuten yli 100 prosessoria, putoaisi kappalehinta 1,23 euron tasolle. Prosessori oli siis niin ominaisuuksiensa kuin myös hintansa puolesta sopiva. [1], [2], [3]

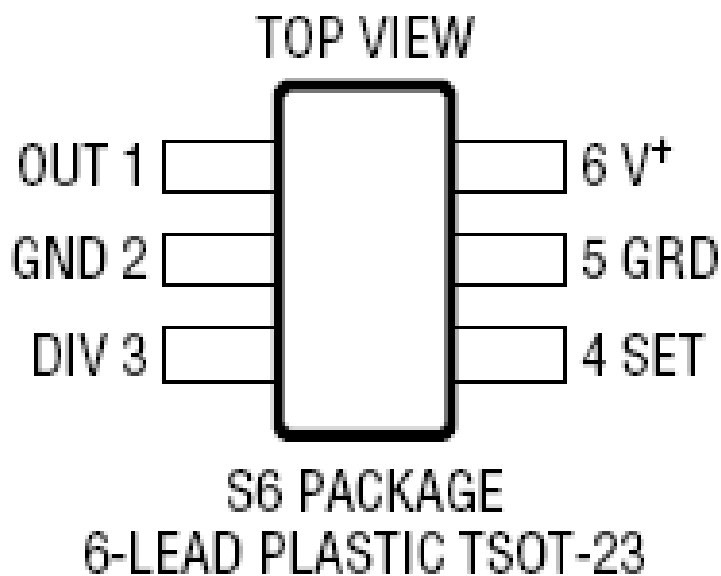
2.2.2 Referenssioskillaattori

Erilaisilla oskillaattorikytkennöillä voidaan tuottaa mm. siniaaltoja, suorakaideaaltoja ja pulsseja [7]. Tässä tapauksessa oskillaattorin aaltomuodolla ei ollut väliä, sillä referenssioskillaattorin jälkeen tuleva jakajapiiri pystyi tunnistamaan ylä- ja alatilaa sekä kantti- että siniaallosta.

Valmiita oskillaattorikytkentöjä löytyi Internetistä ja alan kirjallisuudesta useita, mm. LC-, RC- ja kideoskillaattoreita. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin käyttämään valmista, yhtenä komponenttina saatavaa oskillaattoria johtuen sen helppokäyttöisyydestä ja taajuustabiilisuudesta. Melko kattava valikoima valmiita oskillaattoreita löytyi suoraan Farnellin verkkosivuilta.

Referenssitaajuuden synnyttämiseen tarvittiin oskillaattori, joka pystyisi tuottamaan sopivan taajuuden. Sopiva taajuus oli 10 kHz johtuen haluttavasta kanavavälistä. 10 kHz:n oskillaattoreita ei kuitenkaan löytynyt, joten päätettiin valita suuremmalla taajuudella toimiva oskillaattori. Tämä tarkoitti käytännössä sitä, että taajuuden tulisi olla kymmenien tai satojen kilohertsien luokkaa, jotta se olisi pienellä vaivalla jaettavissa 10 kHz:n taajuuteen. Pienen pohdiskelun jälkeen päädyttiin etsimään 40 kHz:n oskillaattoria, sillä sen jakamiseen tarvittaisiin luvulla 4 jakava jakaja.

Farnellin Internet-katalogista löytyikin tarkoitukseen sopiva komponentti. Komponentiksi valittiin Linear Technologyn LTC6907-oskillaattori. Piiri on oskillaattori, jonka taajuutta voidaan muuttaa välillä 40 kHz - 4 MHz. Taajuuden muuttaminen onnistuu muuttamalla yhden ulkoisen vastuksen arvoa. Piirin virrankulutus on erittäin alhainen, vain 36 μA käytettäessä 3 V:n käyttöjännitettä. Piirin hyväksyy käyttöjännitteeksi myös 5 V:n käyttöjännitteen. [9]



Kuva 2. Referenssioskillaattorin pinnijärjestys.[9]

Oskillaattorin ulostulotaajuus oli mahdollista asettaa seuraavan kaavan avulla:

$$f_{OUT} = \frac{4\text{MHz}}{N} \cdot \left(\frac{50k}{R_{SET}} \right), N = \begin{cases} 10, & \text{DIV Pin} = V^+ \\ 3, & \text{DIV Pin} = \text{Open} \\ 1, & \text{DIV Pin} = \text{GND} \end{cases} \quad (3)$$

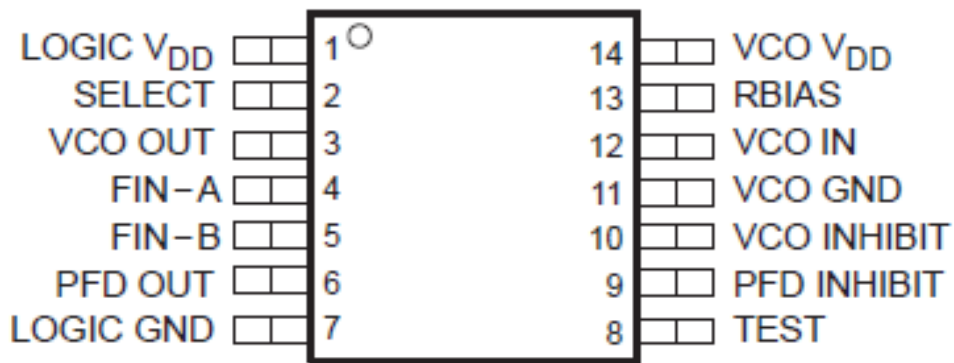
Haluttu ulostulotaajuus oli tässä tapauksessa 40 kHz. Eli DIV-pinni asetettiin käyttöjännitteeseen, ja Rset-vastukseksi valittiin 500 kOhm. Näin kaavasta saatiin ulostulotaajuudeksi 40 kHz.

2.2.3 Jänniteohjattu oskillaattori, VCO

Jänniteohjattu oskillaattori (VCO) on yksi tärkeimpiä PLL-rakenteen komponentteja. Juuri tämä nimenomainen oskillaattori synnyttää kanta-aallon, jonka avulla radiolähetin lähettää halutun datan/informaation. Oskillaattorin taajuutta pystytään muuttamaan sisääntulevaa jännitettä muuttamalla. Useimmissa tapauksissa tämän jännitteen synnyttää vaihevertailijakomponentti. [4]

Tähän radiolähetinprojektiin oli tarkoitus löytää VCO, joka toimisi ainakin 28 - 30 MHz:n taajuusalueella. Piirin käyttöjännitteen tulisi olla 5 V:n luokkaa, jotta se täsmäisi muiden komponenttien käyttöjännitteeseen.

Perusteellisen Internet-katalogien tutkimisen jälkeen löytyi sopiva komponentti. Komponentiksi valittiin Texas Instrumentsin TLC2932A. Kyseinen komponentti on tarkoitettu nimenomaan PLL-rakenteen toteuttamiseen, ja siinä on sekä VCO että vaihevertailija samassa kotelossa.



Kuva 3. TLC2932A. [11]

Kuvassa 3 on kuvattu kyseisen piirin pinnijärjestys, pinnien numeroitinti sekä merkitykset.

VCO:n lukittumistaajuus on 13 - 55 MHz käyttöjännitteestä riippuen, 5 V:n käyttöjännitteellä 15 - 55 MHz. Oskillaattorin taajuutta voidaan hienosäätää ulkoisen biasointivastuksen avulla, joka kytketään VCO V_{DD} :n ja RBIAS:n välille. Piirissä on myös oskillaattorille tehty $\frac{1}{2}$ -jakaja, SELECT-pinni, jolla taajuus saadaan vielä tarvittaessa puolitettua. Piirillä on myös inhibit-pinnit, joiden avulla piiri voidaan laittaa virransäästötilaan. VCO INHIBIT -pinni ylätilassa pysäyttää oskilloinnin ja sammuttaa VCO:n. Alla olevat taulukot 1 ja 2 selventävät INHIBIT ja SELECT-pinnien toimintaa. [11]

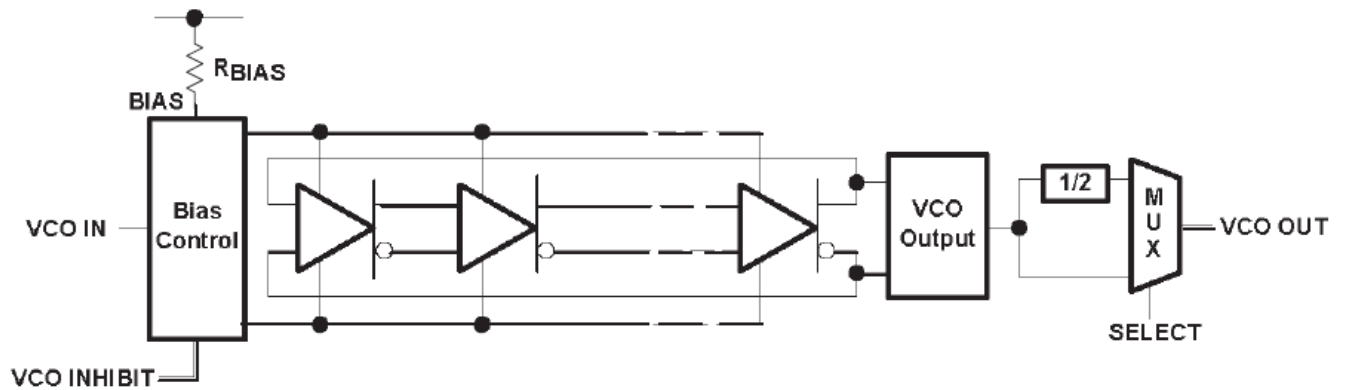
Taulukko 1. SELECT-pinnin vaikutus. [11]

SELECT	VCO OUTPUT
Low	f_{osc}
High	$\frac{1}{2} f_{osc}$

Taulukko 2. INHIBIT-pinnin vaikutus. [11]

VCO INHIBIT	VCO OSCILLATOR	VCO OUT	I _{DD} (VCO)
Low	Active	Active	Normal
High	Stopped	Low level	Power Down

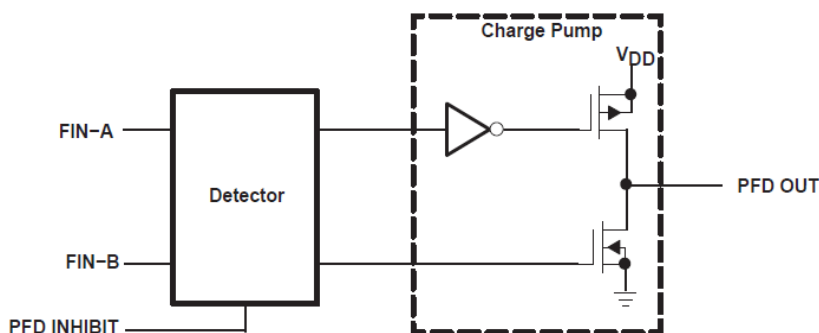
Alla oleva lohkokaavio helpottaa piirin VCO:n toiminnan ymmärtämistä.



Kuva 4. TLC2932A lohkokaavio. [11]

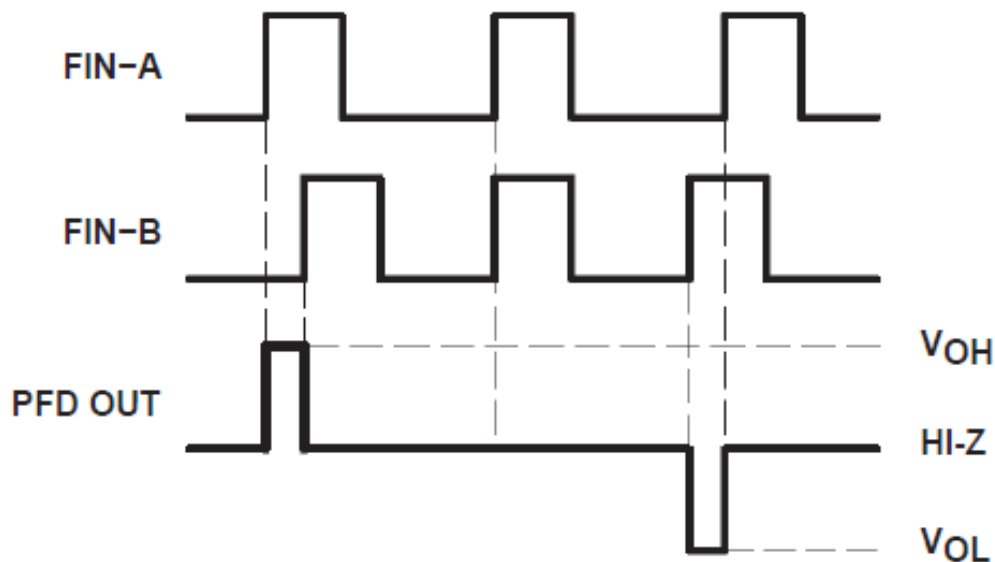
2.2.4 Vaihevertailija, PFD

Vaihevertailijan (PFD) tehtävänä oli muodostaa jänniteohjatun oskillaattorin tarvitsema ohjausjännite. PFD:ssä on yleensä kaksi sisääntuloa ja yksi ulostulo. Kahden sisään menevän signaalin vaihe-erosta PFD muodostaa ulostuloon jännitteen. Ulostuloon tarvitaan alipäästösuodatin, jolla tarpeettomat häiritsevät taajuudet voidaan suodattaa pois ennen seuraavaa komponenttia, joka on yleensä VCO. [4]



Kuva 5. PFD:n lohkokaavio. [11]

Tämä kyseisen piirin vaihevertailija on reunaliiipaistava, ja siinä on sisäinen charge pump. PFD havaitsee vaihe-eron sisääntulojen FIN-A ja FIN-B välillä. Referenssitaajuus ajetaan sisään FIN-A:n ja takaisinkytketty taajuus FIN-B:n. Mikäli FIN-B:n taajuus on referenssitaajuutta jäljessä, piiri kasvattaa ulostulojännitettä. Mikäli taas FIN-B:n taajuus on edellä referenssitaajuutta, lasketaan ulostulojännitettä. Kuvassa 6 on kuvattu kyseinen toiminta. [11]



Kuva 6. PDF:n toiminta. [11]

Kuten VCO-osassa, myös PFD-osassa on inhibit-pinni. Tällä pinnillä saadaan asetettua PFD virransäästötilaan. Taulukosta 3 käy ilmi pinnin vaikutukset PFD:n toimintaan.

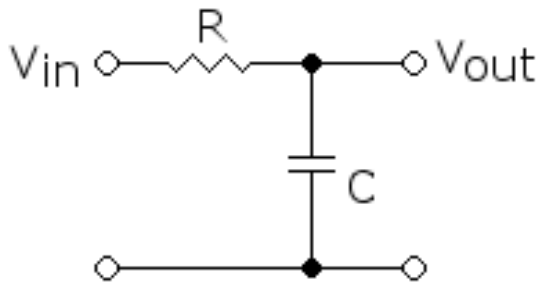
Taulukko 3. Inhibit-pinnin vaikutus. [11]

PFD INHIBIT	DETECTION	PFD OUT	I _{DD} (PFD)
Low	Active	Active	Normal
High	Stopped	Hi-Z	Power Down

2.2.5 Alipäästösuodatin

Alipäästösuodattimen tehtävänä oli suodattaa PFD:n ulostulossa esiintyvät häiritsevät korkeataajuiset signaalit pois. Sen ominaisuuksien avulla voitiin myös vaikuttaa PLL:n asettumisaikaan, eli aikaan, joka kuluu PLL:n lukittumiseen taajuutta vaihdettaessa. Tässä tapauksessa vaihelukitun silmukan asettumisajalla ei ollut suurta merkitystä, sillä laitteelta ei haettu nopeaa taajuudenvaihtoa. Sen tarkastelu voitiin siis jättää vähemmälle huomiolle. [4]

Mutkattomin tapa toteuttaa alipäästösuodatin oli käyttää yksinkertaista RC-alipäästösuodatinta. Suodatin rakennettiin kahdesta peruskomponentista, vastuksesta ja kondensaattorista. Kaavan 4 avulla oli mahdollista laskea suodattimen rajataajuus.



Kuva 7. RC-suodattimen rakenne.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

2.2.6 Jakajapiirit

Jakajapiirien tehtävänä oli jakaa VCO:n takaisinkytkennän ja referenssioskillaattorin taajuudet sopiviksi, jotta systeemi voisi lukittua johonkin tiettyyn ennalta valittuun lähetystaajuuteen. Jakajilla pystyttiin myös määrittämään stepin suuruus. Kun sekä referenssitaajuus että takaisinkytketty taajuus ovat yhtäsuuret ja samanvaiheiset, on systeemi lukittunut määriteltyyn taajuuteen. [4]

Kaavojen 1 ja 2 avulla oli mahdollista laskea tarvittavat jakajapiirien ominaisuudet.

2.2.6.1 Referenssitaajuus

Referenssioskillaattorin taajuus r_{ref} oli 40 kHz. Koska PLL:n stepiksi oli määritelty 10 kHz, täytyi referenssitaajuutta saada pienennettyä neljäsosaan alkuperäisestä. Tähän tarkoitukseen tarvittiin jakajapiiri, joka pystyi jakamaan sisääntulevan taajuuden luvulla 4. Lisäksi piirin tuli toimia 3-5 V:n käyttöjännitteellä.

Internetin hakupalvelujen avulla löytyi sopiva piiri, Texas Instruments SN7497N. Kyseinen piiri on 6-bittinen ohjelmoitava jakaja. Piirin käyttöjännite on 4.75 - 5.25 V, eli sopiva prosessorin käyttöjännitteeseen nähden. Suurin mahdollinen taajuus, jota piiriin voidaan syöttää sisään, on 32 MHz. [5]

Kuudella sisään menevällä bitillä pystyttiin asettamaan haluttu jakosuhte kaavan 5 perusteella. [5]

$$f_{out} = M * \frac{f_{in}}{64} \quad (5)$$

Kaavassa ilmoitettu M vastaa taulukosta 4 löytyvää ulostulon arvoa. Sisääntulotaajuuden f_{in} ollessa 40 kHz, valittiin taulukosta M:n arvoksi 16. Tästä johtuen ulostulotaajuus saatiin sopivaksi kaavan 6 mukaan.

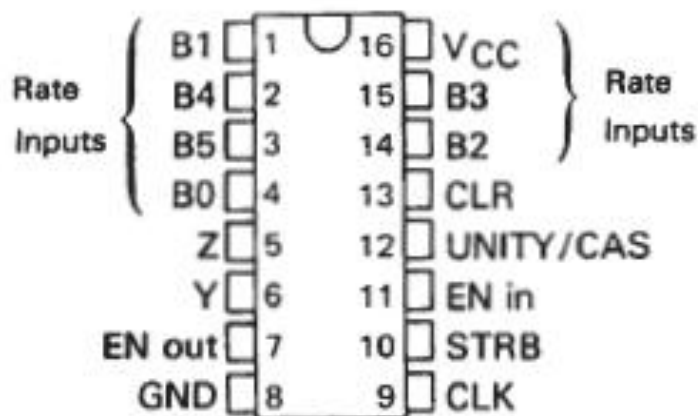
$$f_{out} = 16 * \frac{40kHz}{64} = 10kHz \quad (6)$$

Taulukko 4. Jakosuhteen asettaminen. [5]

			INPUTS								OUTPUTS			NOTES
CLEAR	ENABLE	STROBE	BINARY RATE B5 B4 B3 B2 B1 B0						NUMBER OF CLOCK PULSES	UNITY/ CASCADE	LOGIC LEVEL OR NUMBER OF PULSES			
											Y	Z	ENABLE	
H	X	H	X	X	X	X	X	X	X	H	L	H	H	B
L	L	L	L	L	L	L	L	L	64	H	L	H	1	C
L	L	L	L	L	L	L	L	H	64	H	1	1	1	C
L	L	L	L	L	L	L	H	L	64	H	2	2	1	C
L	L	L	L	L	L	H	L	L	64	H	4	4	1	C
L	L	L	L	L	H	L	L	L	64	H	8	8	1	C
L	L	L	L	H	L	L	L	L	64	H	16	16	1	C
L	L	L	H	L	L	L	L	L	64	H	32	32	1	C
L	L	L	H	H	H	H	H	H	64	H	63	63	1	C
L	L	L	H	H	H	H	H	H	64	L	H	63	1	D
L	L	L	H	L	H	L	L	L	64	H	40	40	1	E

Sisääntulevia pinnejä oli jakosuhteenasetuspinnien lisäksi vielä CLK, STRB, EN in, UNITY/CAS, ja CLR. Näitten pinnien avulla oli mahdollista kontrolloida jakajapiirin toimintaa. Kun CLK, ENABLE ja STROBE olivat alatilassa, piirin jakajaominaisuus oli toiminnassa. Jos taas kyseisistä pinneistä CLK ja STROBE ovat ylätilassa, piirin laskuri oli pysäytetty. EN in ja UNITY/CAS -pinnejä ei tarvittu, sillä niillä oli mahdollista säätää piirin lisäominaisuuksia, jotka olivat tässä työssä tarpeettomia. Näiden pinnien käyttö käy ilmi taulukosta 4. [5]

Piirin kolmesta ulostulosta tarvittiin vain Z-ulostuloa, jota käytettiin jaetun taajuuden ulostulona. Kaikki piirin lähdöt ja tulot näkyvät kuvassa 8.



Kuva 8. SN7497N-piirin pinnijärjestys. [5]

2.2.6.2. Takaisinkytketty taajuus

Takaisinkytketyn taajuuden jakamiseen tarvittiin huomattavasti suurempaan jakosuhteeseen pystyvä jakaja kuin referenssioskillaattorin taajuuden jaossa käytetty piiri. Tämä käy ilmi kaavasta 2.

Tällä hetkellä r_f oli 10 kHz, joka saatiin edellisen jakajapiirin ulostulosta. f_{out} in haluttiin olevan 29.810 MHz - 29.940 MHz. Jakajan tuli siis pystyä jakamaan usealla arvolla, jotta saataisiin käyttöön koko sallittu taajuusalue. Alla esitellyn kaavan 7 avulla oli mahdollista laskea halutut jakajan arvot. Kaava 7 muodostettiin muokkaamalla kaavaa 2.

$$N = \frac{f_{out}}{f_r} \quad (7)$$

Sijoittamalla kaavaan 7 haluttu ulostulotaajuus ja edellä määritelty r_f , saatiin lasketuksi $N:n$ arvot.

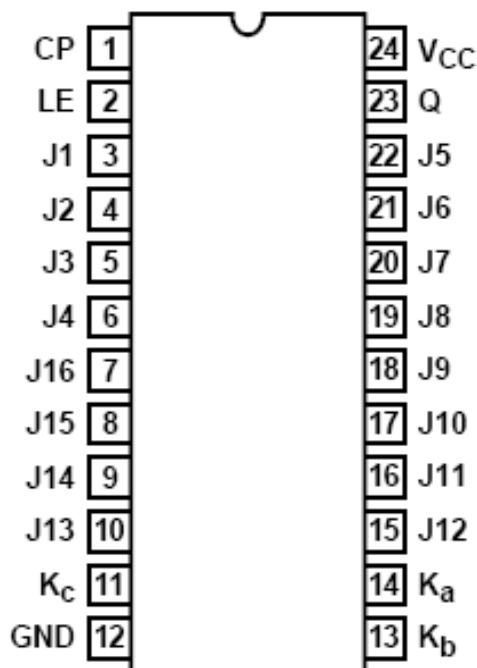
$$N1 = \frac{29810 \text{ kHz}}{10 \text{ kHz}} = 2981$$

$$N2 = \frac{28940 \text{ kHz}}{10 \text{ kHz}} = 2994$$

Takaisinkytketyn taajuuden jakajan tuli siis pystyä jakamaan VCO:n taajuutta arvoilla 2981 - 2994. Piirin tuli myös toimia 5 V:n käyttöjännitteellä.

Erilaisia jakajapiirejä löytyi nopeasti Internetin hakupalveluiden avulla. Sopivan piirin löytäminen vei kuitenkin erittäin paljon aikaa, koska useimpien jakajapiirien jakosuhteet ylsivät vain lukuihin 128 tai 256.

Lopulta sopiva piiri löytyi Texas Instrumentsin Internet-katalogista. CD74HC4059 on ohjelmoitava laskuripiiri, joka pystyy jakamaan sisääntulevan taajuuden millä tahansa luvulla välillä 3 - 15999. Piiri toimii 2 - 6 V:n käyttöjännitteellä. [6]



Kuva 9. CD74HC4059-piiri. [6]

Pinnejä J1-J16, Ka, Kb ja Kc käytetään jakosuhteen asettamiseen. Q toimii ulostulona, josta saadaan jaettu taajuus ulos piiriltä. LE-pinnillä voidaan kontrolloida ulostulon toimintaa.

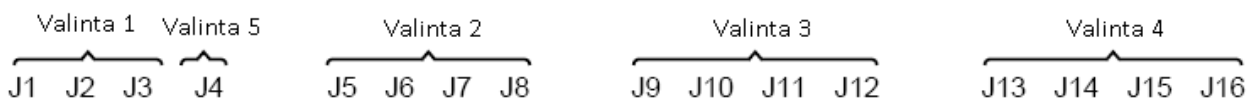
Halutun jakajan asettaminen tapahtuu seuraavan kaavan mukaan:

$$N = \text{Mode} * (1000 * \text{valinta 5} + 100 * \text{valinta 4} + 10 * \text{valinta 3} + 1 * \text{valinta 2}) + \text{valinta 1} \quad (8)$$

Mode valitaan Ka-, Kb- ja Kc-pinnien avulla taulukon 5 mukaisesti. Kun mode on saatu asetettua, asetetaan J-inputtien arvot kuvan 10 mukaisesti.

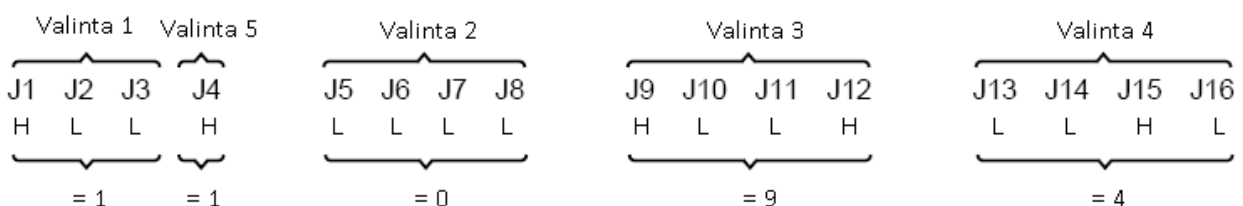
Taulukko 5. Moden valitseminen. [6]

K _a	K _b	K _c	MODE DIVIDES-BY
H	H	H	2
L	H	H	4
H	L	H	5
L	L	H	8
H	H	L	10



Kuva 10. Valintojen suhde J-inputteihin. [6]

$N = 2981$ laskettiin asettamalla aluksi mode = 2, eli Ka, Kb ja Kc ylätilaan. Tämän jälkeen J-inputit asetettiin kuvan 11 mukaisesti.



Kuva 11. Jakosuhteen asettaminen.

Tulos voitiin tarkistaa sijoittamalla arvot kaavaan 6.

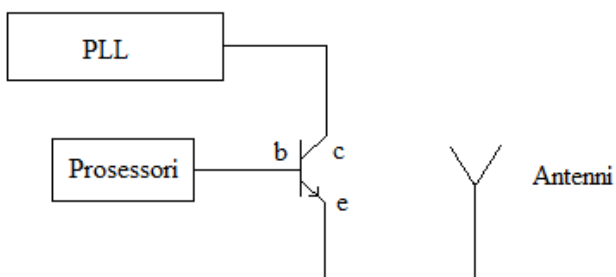
$$\begin{aligned} N &= 2 * (1000 * 1 + 100 * 4 + 10 * 9 + 1 * 0) + 1 \\ &= 2 * 1490 + 1 \\ &= 2981 \end{aligned}$$

Edellä osoitetun tarkistuskaskun perusteella voitiin osoittaa, että jakosuhteen asetus oli onnistunut.

2.2.7 Modulaattori

Modulaattorin tehtävänä oli moduloida haluttu informaatio vaihelukitun silmukan muodostamaan kanta-aaltoon. Tässä tapauksessa haluttiin k ytt   modulointimuotona morsetusta.

Helpoin tapa toteuttaa kyseisenlainen automaattinen morsetin, oli k ytt   yksinkertaista BJT-transistoria. Transistoria käytettiin kytkimen tavoin siten, että prosessori ohjasi kytkimen aukeamista ja sulkeutumista. Eli kanta-aaltosignaali ajettiin sisään kollektorille ja otettiin emitterilt  ulos. Kanta kytkettiin prosessorin signaalipinniksi määriteltyyn piinniin. Transistorina toimi 3904-sarjan transistori. Alla oleva kuva 12 havainnollistaa kytkent  .



Kuva 12. Modulaattorisuunnitelma.

3. Kokoaminen ja testaus

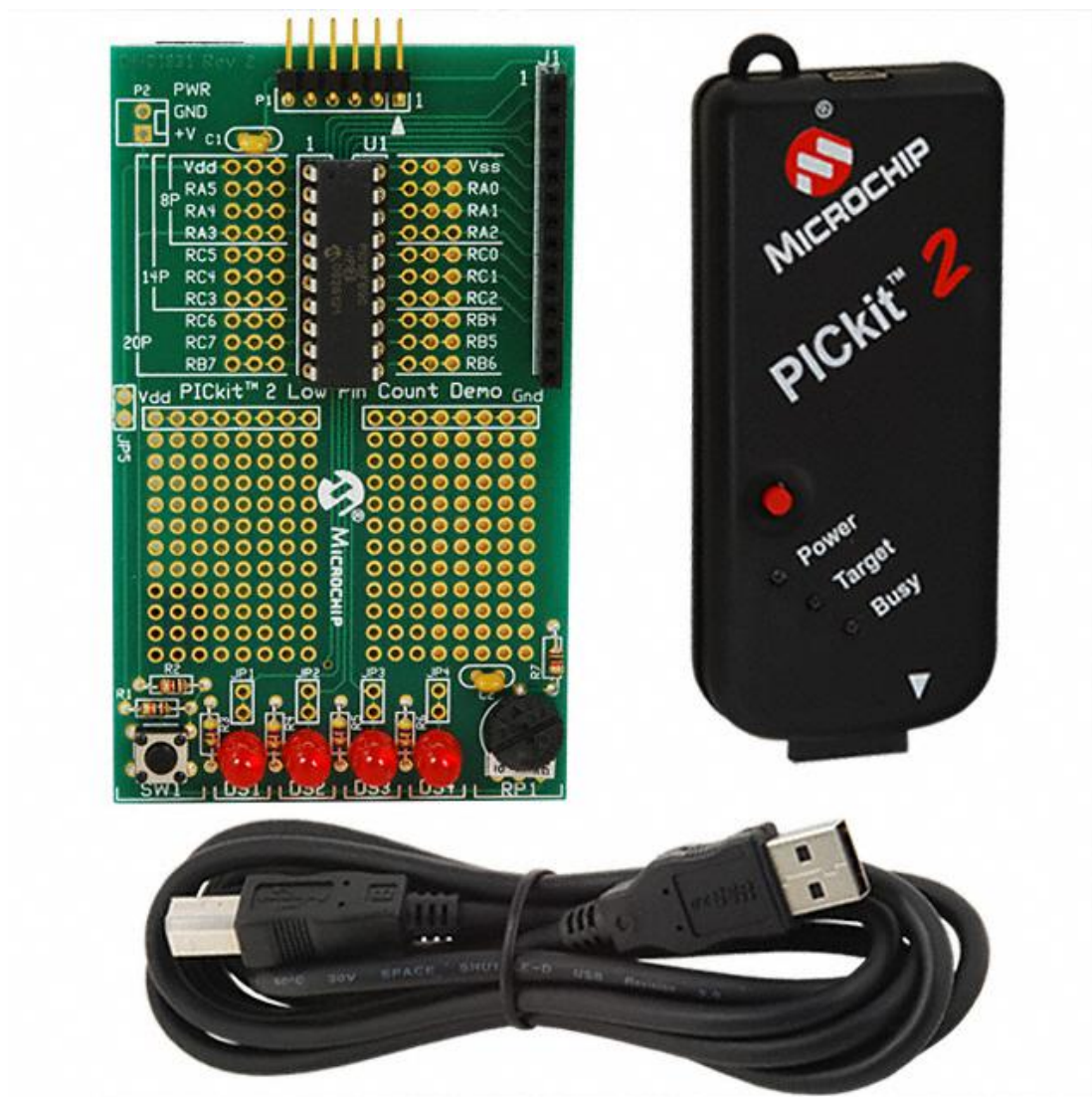
Suunnittelun ja osien valitsemisen jälkeen oli vuorossa valittujen komponenttien testaaminen yksittäin, sekä lopuksi laitteen piirilevyn suunnittelu. Osien testaamiseen käytettiin tavallista kytkentäalustaa, oskilloskooppia ja funktiogeneraattoria. Myös muutamia lisäkomponentteja, kuten kondensaattoreita ja vastuksia, tarvittiin testauksissa.

Testauksen tärkein tehtävä oli varmistaa eri komponenttien yhteensopivuus toisiinsa nähden, vaikka komponenttien yhteensopivuutta oli jo tarkasteltu datalehtien perusteella. Esimerkiksi jakajapiirien sisäänmeno- ja ulostulojännitteiden tuli olla yhteensopivia, jotta PLL-systeemi saataisiin toimimaan.

Testausvaihe toteutettiin Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa Microteknialla, sillä kotiloista ei kaikkia tarvittavia laitteita löytynyt.

3.1 Prosessori

Prossessorin ohjelmoimiseksi tilattiin PIC:n oma kehityskitti, PICkit 2 Starter Kit. Tässä kehityskitissä olivat mukana ohjelmointiin tarvittavat ohjelmistot, ohjelmointilaite sekä muutama erilainen prosessori. Ohjelmointilaitteeseen kuului myös demolevy, jolle oli kytketty prosessorin lisäksi mm. ledejä ja kytkimiä. Ledien avulla voitiin kätevästi simuloida modulaattorin toimintaa. Demolevyltä löytyi myös paikkoja, joihin oli mahdollista tinata omia kytkentöjä tai johdotuksia. Nämä tilat näkyvät kuvassa 13 prosessorin molemmin puolin sekä prosessorin ja ledirivin välisessä tilassa.



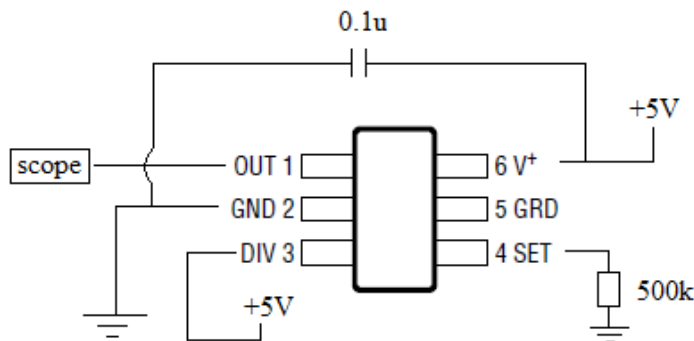
Kuva 13. PICKit 2.

Prossessorin ohjelmoimiseen käytettävän ohjelmiston helppokäyttöisyydestä ja selkeydestä johtuen prossessorin ohjelmointi ei tuottanut juurikaan ongelmia lukuunottamatta muutamia pieniä alkuvaikeuksia. Suurin osa prosessoreiden esimerkkiohjelmista ja esimerkeistä oli koodattu assembler-kielellä, mikä aiheutti hieman lisäpohdintaa, koska ohjelmointikielenä päädyttiin käyttämään C-kieltä.

Prossessorin ohjelmakoodista tuli kokonaisuudessa hyvin lyhyt, vain muutamia kymmeniä rivejä. Koodiin mahdutettiin rekistereiden alustuksia, I/O-pinnien ohjauksia ja itse koodi.

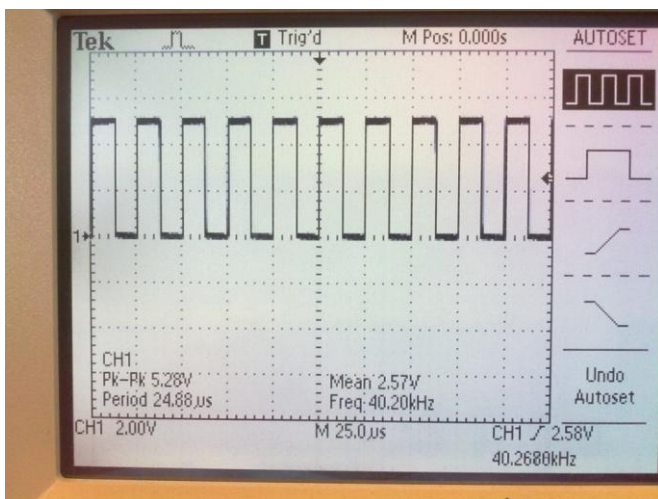
3.2 Referenssioskillaattori

Referenssioskillaattori testattiin siten, että piirin kytkemiseen käytettiin kytkentäalustaa ja ulostulotaajuutta tarkasteltiin oskilloskoopista. Piirin jalkoihin tinattiin pienet johdonpätkät helpottaamaan kytkentäalustaan kytkemistä, sillä komponentti oli pintaliitosmallinen ja fyysisiltä mitoiltaan erittäin pieni. Valmis kytkentä löytyi LTC6907:n datalehddestä.



Kuva 14. Oskillaattorin testauskytkentä.

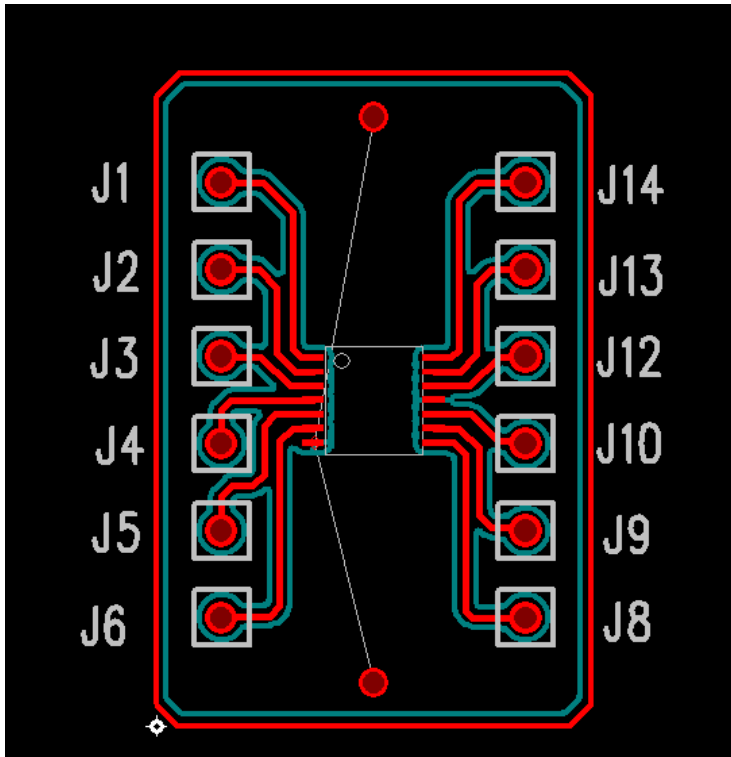
Kuvassa 15 näkyy oskilloskoopin näyttö, josta voidaan todeta oskillaattorin toimivan suunnitellulla tavalla. Myös jännitetaso on sopiva silmälläpitäen muita komponentteja, sillä referenssioskillaattorin jälkeen vuorossa on jakajapiiri, joka tunnistaa taajuuden ylätilaksi yli 2 V:n jännitteet ja alatilaksi alle 0.8 V:n jännitteet.



Kuva 15. Referenssioskillaattorin taajuus.

3.3 Jänniteohjattu oskillaattori, VCO

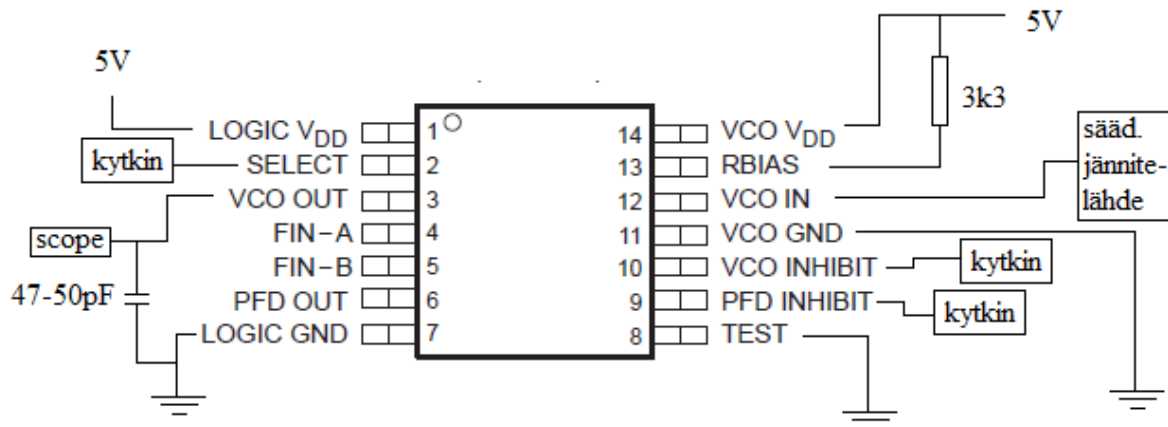
VCO:n testaamista varten täytyi tehdä erillinen pieni piirilevy, johon komponentti saatiin juotettua kiinni. Tämä siksi, että piiri oli erittäin pieni pintaliitoskomponentti ja sen jalat olivat lähellä toisiaan, eikä voinut niihin voinut suoraan tinata johtoja kiinni.



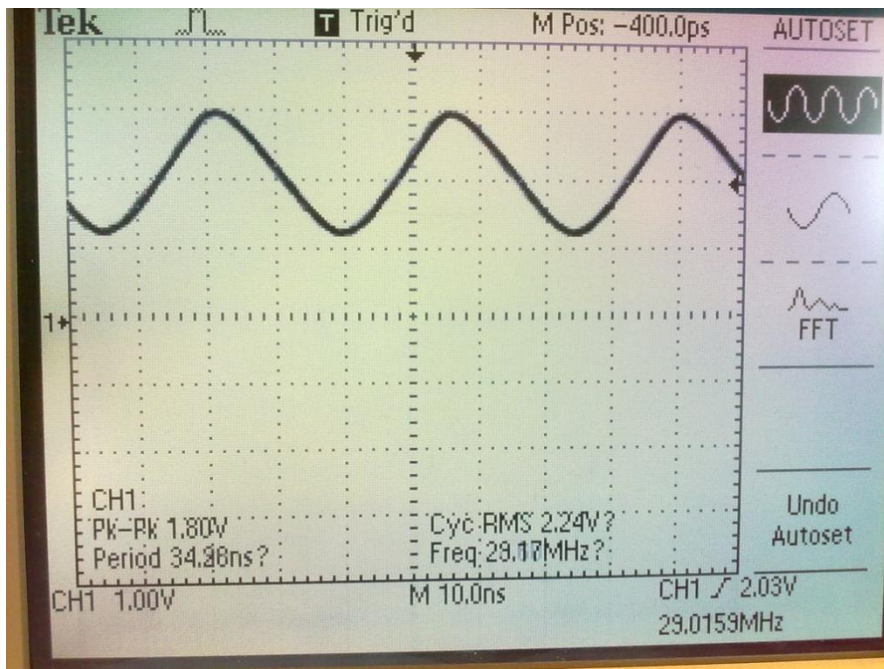
Kuva 16. Testipiirilevy VCO:lle.

VCO:n ohjausjännite otettiin kytkentäpöydän säädettävästä jännitelähteestä, jotta ulostulotaajuus saataisiin säädettyä sopivaksi. VCO-piirin ulostulo kytkettiin oskilloskooppiin, jotta oskillaattorin synnyttämää taajuutta voitiin tarkastella. Tarvittavat ohjauspinnit, kuten Select, kytkettiin kytkentäpöydän kytkimiin, joilla pinneihin voitiin ajaa joko 0 V:n tai 5 V:n jännitteet. Vaihevertailijaa koskevat pinnit tuli myös kytkeä lukuunottamatta FIN-A, FIN-B ja PFD_OUT-pinnejä. Mikäli vaihevertailijan pinnejä ei kytketty, ei VCO-puolikaan suostunut toimimaan. INHIBIT- ja TEST-pinnit kytkettiin kytkimien kautta maihin, samoin myös SELECT. Biasointi vastukseksi valittiin 3.3 kOhm, koska se oli sopiva ajatellen 29 - 30 MHz:n ulostulotaajuutta. VCO:n ulostulosta maihin kytkettiin 47 - 50 pF:n kondensaattori, jotta ulostulosignaalin jännitetaso saatiin sopivaksi seuraavaa komponenttia ajatellen. Myös ulostulotaajuuden muoto parani kondensaattorin kytkennän myötä huomattavasti. Kuvat 18 ja 19 kuvaavat ulostulosignaalia ennen kondensaattorin lisäämistä ja kondensaattorin lisäämisen jälkeen.

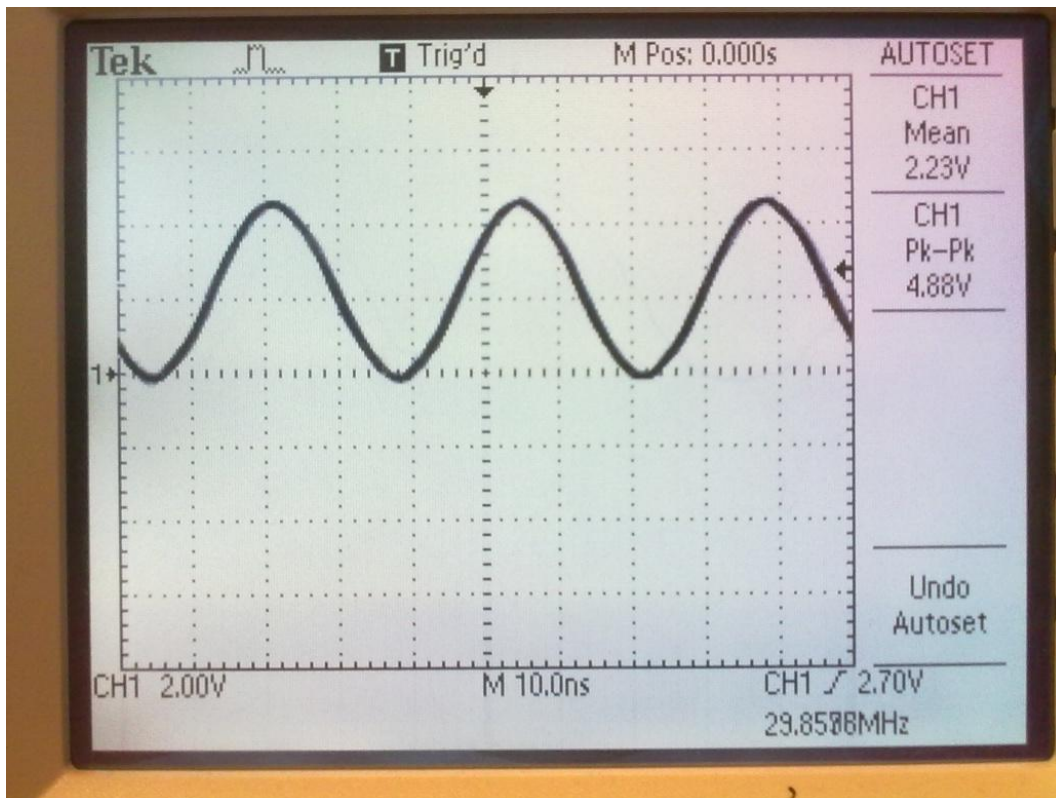
Alla esitellystä kuvasta käyvät ilmi tarvittavat kytkennät.



Kuva 17. Testauskytkentä.



Kuva 18. VCO:n ulostulo ilman kondensaattoria.



Kuva 19. VCO:n ulostulo kondensaattori kytkettynä.

3.4 Vaihevertailija, PFD

PFD:n testaus toteutettiin siten, että molempiin sisäänmenoihin kytkettiin funktiogeneraattorit. Funktiogeneraattoreista ajettiin eritaajuisia kantiaaltoja ja katsottiin oskilloskoopilla ulostulosta, miten komponentti käyttäytyi.

PFD:n havaittiin käyttäytyvän juuri niin kuin pitääkin, eli kun b-sisääntulon taajuus oli a-sisääntuloa jäljessä, komponentin lähdössä näkyi 5 V:n jännite. Jos taas b-sisääntulo oli a-sisääntuloa edellä, komponentin lähdössä näkyi 0 V:n jännite.

3.5 Alipäästösuodatin

Alipäästösuodattimen testaamista varten koko PLL-systeemi kasattiin kytkentäpöydälle mahdollisimman pienillä johdinvedoilla, jottei tarpeettomia häiriösignaaleita esiintyisi johtimissa.

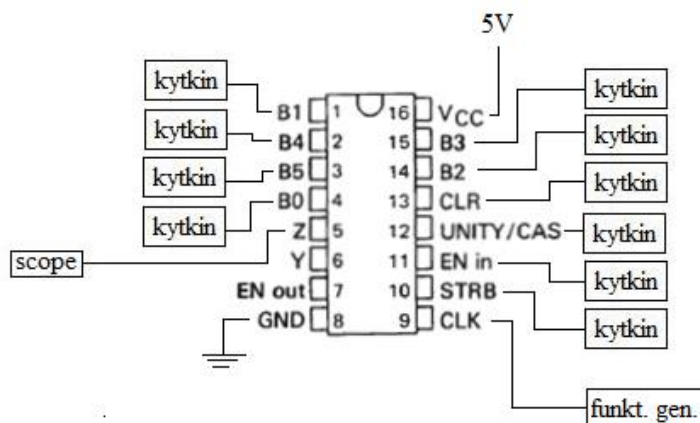
Suodattimen rajataajuuden sopivuus saatiin selville tarkkailemalla VCO:n ulostulossa esiintyvää signaalia. Tässä signaalissa ei saanut esiintyä suurtaajuisia häiriösignaaleja. Tässä yhteydessä testattiin myös systeemin toiminta taajuudenvaihdon yhteydessä. Taajuus vaihtui odotetulla tavalla. Tämä asia todettiin oskilloskoopin näytöltä ja suodatin todettiin toimivaksi.

3.6 Jakajapiirit

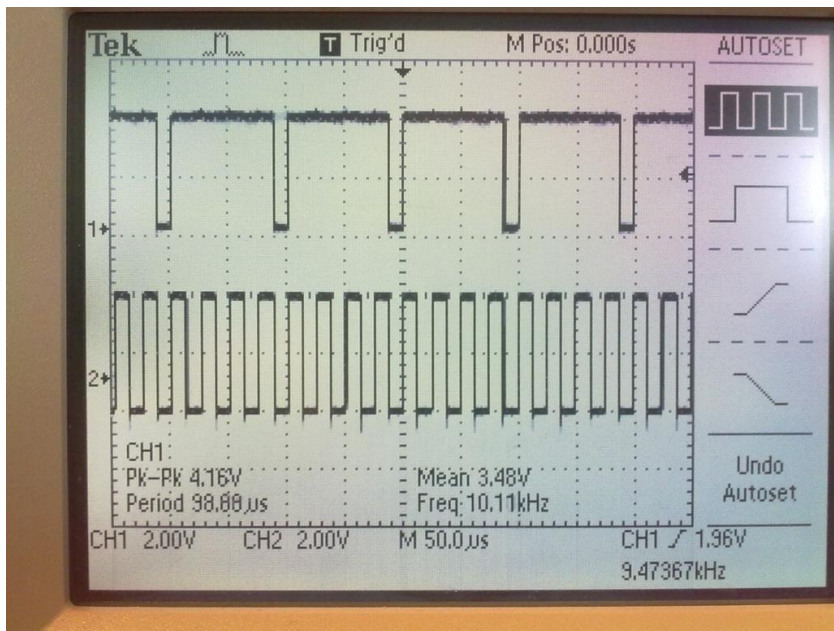
Jakajapiirien testaus tapahtui asettamalla sopiva jakosuhde, ajamalla funktiogeneraattorin signaali jakajan sisääntuloon ja katsomalla oskilloskoopilla piirin ulostulosta tuleva signaali. Testauksen ajaksi jakajapiirit kytkettiin kytkentäalustaan.

3.6.1 Referenssijakaja

Referenssijakajan tehtävänä oli jakaa 40 kHz:n taajuinen signaali 10 kHz:n taajuuteen. Kuten jo edellisessä osiossa todettiin, täytyi jakajan M-arvoksi asettaa luku 16. Taulukon 4 perusteella pinni B4 asetettiin ylätilaan ja muut pinnit alatilaa. Näin jakajapiirin ulostuloon saatiin 10 kHz:n taajuus. Kuvassa 21 on esitelty oskilloskoopilla mitattu taajuus.



Kuva 20. Referenssijakajan kytkentä.

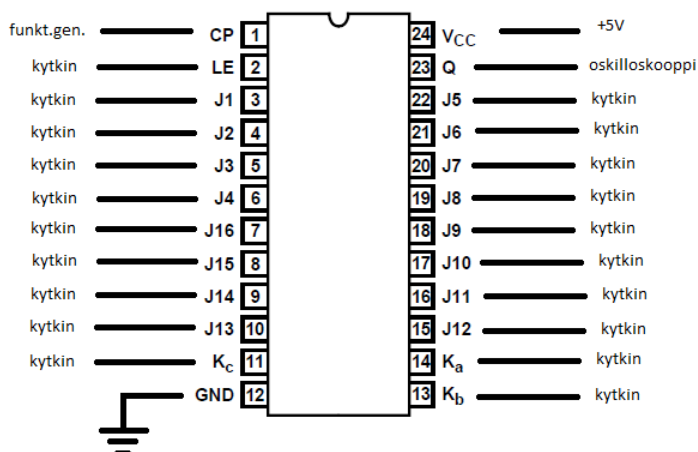


Kuva 21. Referenssijakajan ulostulo.

3.6.2 Takaisinkytketty jakaja

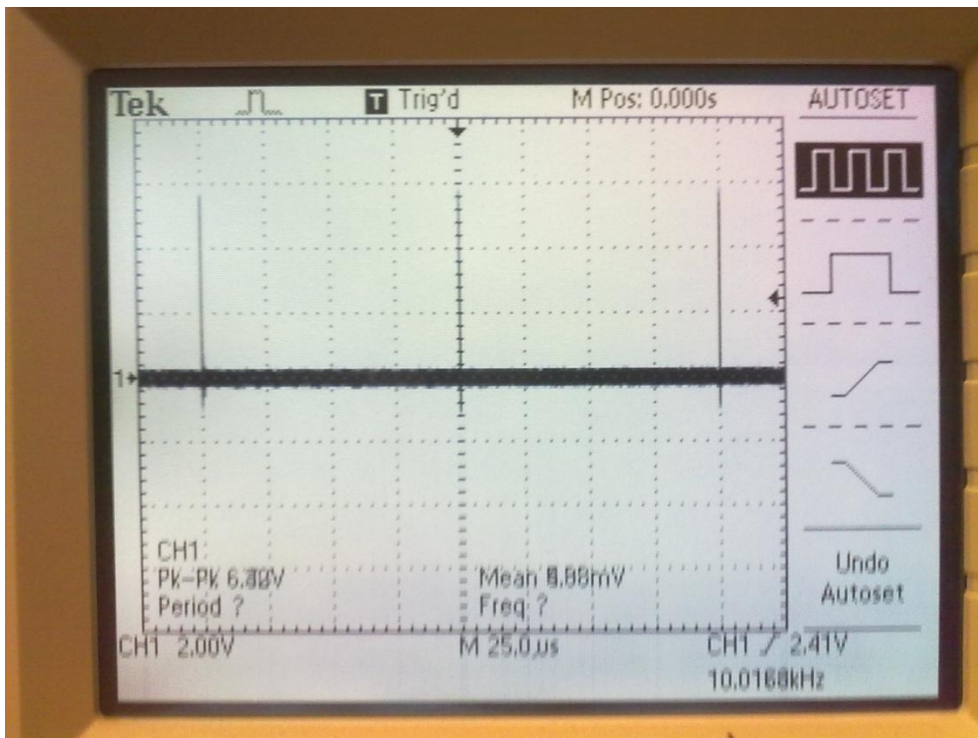
Takaisinkytketyn jakajan tarkoitus oli jakaa VCO:lta lähtevä signaali luvuilla 2981..2994. Sopiva jakosuhte saatiin asetettua luvussa 2.2.6.2 esitetyllä tavalla.

Kuvassa 22 on esitelty testauksessa käytetty kytkentä. Kaikki jakosuhteen asetukseen liittyvät pinnit kytkettiin kytkimiin, joiden avulla oli helppo ajaa pinneihin joko alatila (0 V) tai ylätila (5 V). Kaikki pinnit tuli kytkeä joko maihin tai käyttöjännitteeseen, sillä mikäli yksikin pinni jäi kellumaan, ei komponentti toiminut.



Kuva 22. KytKentä.

Jakajan sisääntuloon ajettiin funktiogeneraattorin tuottama 29.810 MHz:n taajuus. Jakosuhteeksi asetettiin 2981. Ulostulossa tuli näkyä 10 kHz:n jännite, mikä näkyy kuvassa 23. Näin komponentin voitiin todeta toimivan odotetulla tavalla.



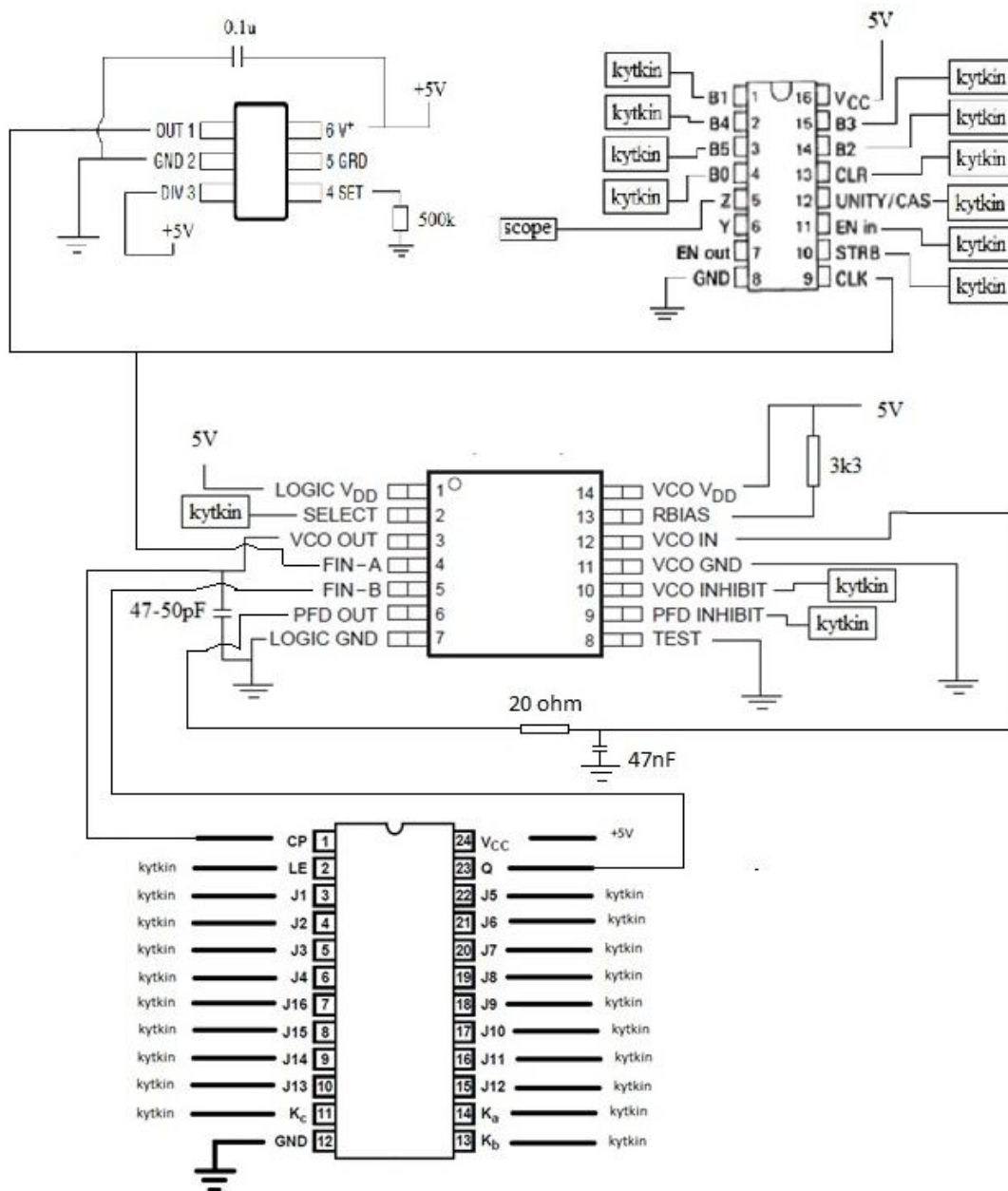
Kuva 23. Signaali jakajan ulostulossa.

3.7 Modulaattori

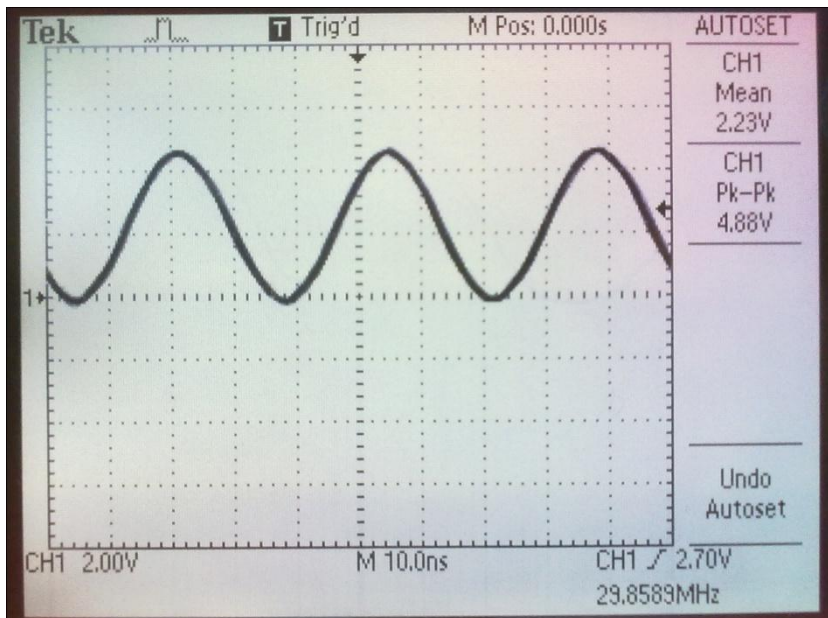
Modulaattorin testauksessa käytettiin apuna prosessorin ohjelmoinnissa käytettyä demolevyä, itse prosessoria ohjelmakoodeineen sekä VCO-komponenttia. Prosessorin datapinniksi ohjelmoidun pinnin kohdalle demolevyllä tinattiin johto, joka kytkettiin transistorina toimivan modulaattorin kannalle. Kollektorille syötettiin VCO-komponentin signaali. Emitterille kytkettiin pikkuruinen lanka-antenni, jotta viereisellä pöydällä olevalla radiovastaanottimella voitaisiin havaita modulaattorin toimivuus. Systeemi käynnistettiin ja radiovastaanottimesta saatiin kuulumaan halutunlainen morsetus.

3.8 Kokonaisuuden testaaminen

Ennen piirilevyn piirtämistä päätettiin PLL-systeemiä kokeilla kytkentäpöydällä. Tämä osoittautuikin odotettua haastavammaksi, sillä kytkentään tarvittiin useampi kytkentäpöytä. Myös liian pitkät johdinvedot aiheuttivat ongelmia mm. signaaleissa esiintyvänä häiriöinä sekä signaalien voimakkuuksien vaimenemisina. Loppujen lopuksi systeemi saatiin toimimaan tuottaen kuvan 25 mukaisen signaalin.



Kuva 24. Kytkentä.



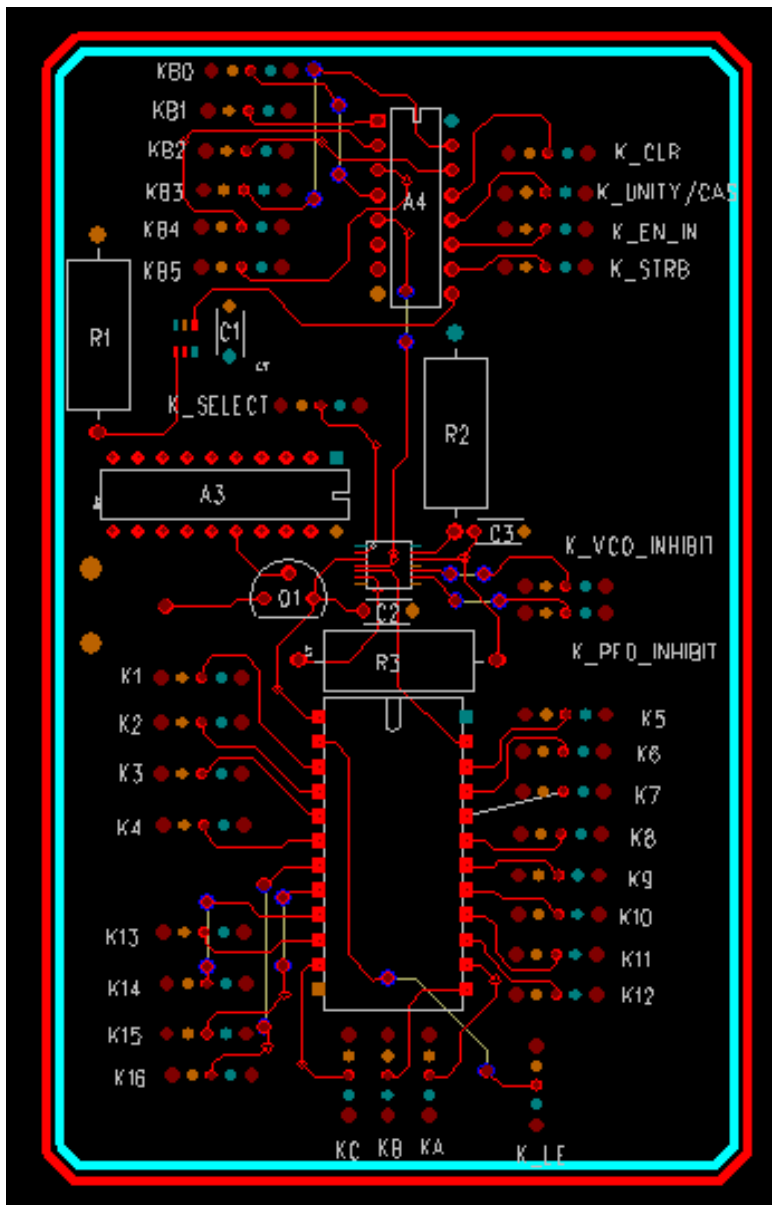
Kuva 25. PLL-systeemi toiminnassa.

3.8 Piirilevy

Kun kaikki komponentit oli testattu ja todettu toimiviksi, oli piirilevyn piirtämisen aika. Piirilevy piirrettiin käyttäen Mentor Graphicsin Pads -ohjelmistoa.

Aluksi piirrettiin kaikkia komponentteja vastaavat PCB-kuvat layout-puolella. Kuvien piirtämisen jälkeen siirryttiin ohjelman logic-puolelle ja laadittiin komponenttien vaatimat kuvat johdotuksia varten. Tämän jälkeen logic-puolella tehtiin tarvittavat johdinvedot komponenttien välille ja lisättiin tarvittavat lisäkomponentit, kuten kondensaattorit ja vastukset. Seuraavassa vaiheessa otettiin käyttöön layout-puoli, jossa piirrettiin sopivan kokoinen piirilevy, sijoiteltiin systeemin komponentit levyille ja lopuksi tehtiin johdinvedot sekä kuparoinnit.

Komponentit ja kytkimet yritettiin saada ryhmiteltyä mahdollisimman selkeästi käytön kannalta, eli samaan piiriin vaikuttavat kytkimet sijoitettiin samaan paikkaan. Tätä piirilevyä voidaan pitää testipiirilevynä, sillä esimerkiksi toisen jakajapiirin ohjaus on toteutettu kytkimillä, eikä alkuperäisen suunnitelman mukaisesti prosessorin ohjaamana. Tämä siksi, että tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuva kokoaminen ja etenkin testaus olisi helpompaa.



Kuva 26. Piirilevy.

4. Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella Anturikeskus Oy:lle HF-radiotaajuuksilla toimiva radiolähetin sekä testata laitteen komponenttien yhteensopivuus ja toimivuus.

Suunnitteluvaihe osoittautui arveltua työläämmäksi, sillä sopivanlaisten komponenttien löytäminen nykypäivän komponenttiviidakosta vei yllättävän paljon aikaa. Osaltaan asiaan vaikuttivat oma vähäinen tietämykseni koskien radiotekniikkaa.

Testausvaihe sujui ilman suurempia ongelmia. Pientä päänsärkyä ja työn aikataulun venymistä aiheutui kuitenkin muutaman komponentin takia. Esimerkiksi komponenttien pienikokoisuuden takia jouduttiin käyttämään apupiirilevyjä. Kaikki ongelmat saatiin kuitenkin ratkaistua.

Asetetut tavoitteet ja suunnitteluvaatimukset toteutuivat: sopivat komponentit saatiin valittua ja testattua ja piirilevy piirrettyä. Mikäli aikaa olisi ollut hieman enemmän, laitteen olisi voinut koota piirilevylle. Tästä huolimatta projektin lopputulokseen voidaan olla tyytyväisiä.

Opin työn aikana erittäin paljon radiotekniikasta, elektroniikkasuunnittelusta ja sen mukanaan tuomista haasteista.

5. Lähdeluettelo

- 1 Farnell Internet Catalog [viitattu 3.4.2010]
<fi.farnell.com>
- 2 MicroChip Internet Catalog. [viitattu 3.4.2010]
<www.microchip.com>
- 3 PIC16F690 Datasheet, February 2008 [viitattu 3.4.2010]
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41262E.pdf>>
- 4 Bo Bernhardsson: PLL Design and Frequency Control [viitattu 3.4.2010]
< <http://www.control.lth.se/~bob/lecture02.pdf>>
- 5 SN7497N Datasheet, March 1988 [viitattu 3.4.2010]
<<http://pdf1.alldatasheet.net/datasheet-pdf/view/27430/TI/SN7497N.html>>
- 6 CD74HC4059 Datasheet, February 1998 [viitattu 3.4.2010]
< <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27056/TI/CD74HC4059.html>>
- 7 Martti Koskinen: Analogia-suunnittelu, 2002 [viitattu 3.4.2010]
- 8 Jukka Aaltonen, Seppo Kousa, Jyrki Stor-Pellinen: Elektroniikan perusteet, Joulukuu 2004, 4.painos [viitattu 3.4.2010]
- 9 LTC 6907 Datasheet, Rev. A, 2005 [viitattu 3.4.2010]
< <http://www.farnell.com/datasheets/84288.pdf>>
- 10 Sampsa Korhosen opinnäytetyö [viitattu 3.4.2010]

11 TLC2932A Datasheet, October 2005 [viitattu 3.4.2010]

<<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tlc2932a.pdf>>